

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
9. August 2001 (09.08.2001)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 01/57977 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: H01S 5/183, 5/026 (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): STEINLE, Gunther [DE/DE]; Hans-Mielich-Str. 19, 81543 München (DE). WOLF, Hans-Dietrich [AT/DE]; Höhenkirchener Str. 40, 85662 Hohenbrunn (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE01/00352 (74) Anwalt: EPPING HERMANN & FISCHER; Postfach 12 10 26, 80034 München (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum: 30. Januar 2001 (30.01.2001) (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, KR, US.

(25) Einreichungssprache: Deutsch (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität: 100 04 398.4 2. Februar 2000 (02.02.2000) DE

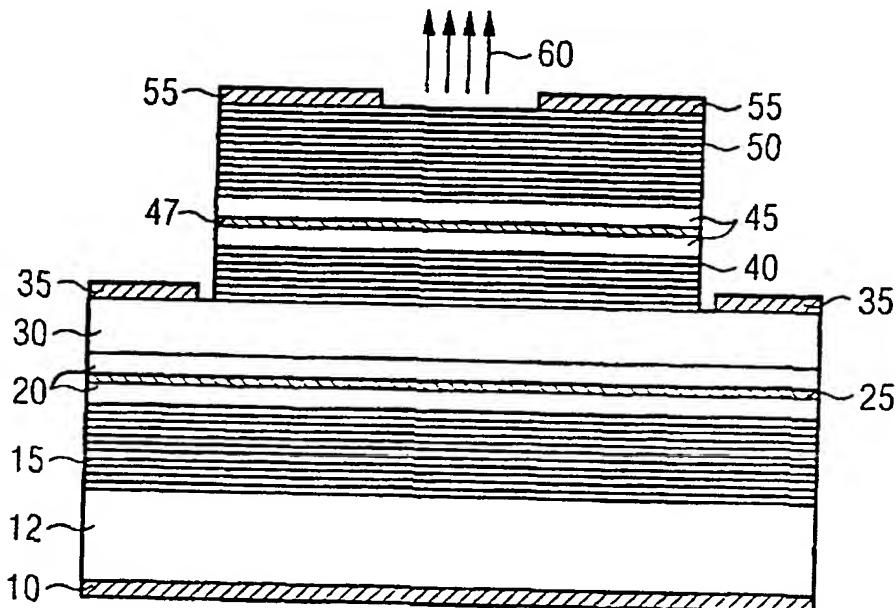
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): INFINEON TECHNOLOGIES AG [DE/DE]; St. Martin-Str. 53, 81669 München (DE).

Veröffentlicht:  
— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: VCSEL WITH MONOLITHICALLY INTEGRATED PHOTODETECTOR

(54) Bezeichnung: VCSEL MIT MONOLITHISCH INTEGRIERTEM PHOTODETEKTOR



(57) Abstract: The invention relates to a VCSEL that comprises an active layer (47), a photodetector (20, 25) in one of the DBR gratings (15; 40, 50) and a radiation-absorbing layer (25) that lies in the antinode of a laser mode. The laser and the photodetector are electrically controlled via a common contact (35) on a thick, highly doted spacer layer (30) that ensures low laser impedance and low electrical disturbance between the laser and the photodetector.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

**WO 01/57977 A1**



— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

---

**(57) Zusammenfassung:** VCSEL mit einer aktiven Schicht (47), mit einem Photodetektor (20, 25) in einem der DBR-Gitter (15; 40, 50) und mit einer strahlungsabsorbierenden Schicht (25), die in einem Schwingungsbauch einer Lasermode angeordnet ist. Laser und Photodetektor werden über einen gemeinsamen Kontakt (35) auf einer dicken, hoch dotierten Spacer-Schicht (30) elektrisch angesteuert, die für niedrige Laserimpedanz und geringes elektrisches Übersprechen zwischen Laser und Photodetektor sorgt.

## Beschreibung

### VCSEL mit monolithisch integriertem Photodetektor

5 Die vorliegende Erfindung betrifft VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) mit einem Photodetektor, der monolithisch in dem Resonator zwischen den Resonatorenspiegeln (DBR-Gitter) integriert ist, für optische Übertragungsstrecken für hohe Datenraten.

10

Die elektrischen und optischen Eigenschaften, wie z.B. Schwellenstrom und differentieller Wirkungsgrad, variieren bei Laserdioden von Bauelement zu Bauelement. Die Eigenschaften jedes Bauelementes hängen von der Temperatur ab und sind 15 lang- und kurzzeitigen Schwankungen unterworfen. Deshalb ist es erforderlich, über ein elektrisches Rückkoppelsignal zu verfügen, das direkte Informationen über die tatsächliche optische Ausgangsleistung des Lasers liefert und verwendet werden kann, um sowohl die Gleichstromvorspannung (bias) als 20 auch die Modulationstiefe des Laserstromes auch während der Übertragung nachzuregeln. Die mit dem Aufbau einer Vorrichtung zur Einkopplung eines zwar geringen, aber doch bestimmten Anteils der Laserstrahlung in einen externen Photodetektor verbundenen Kosten führten zu der Entwicklung monolithisch integrierter Bauelemente.

Eine Reihe von VCSEL-Strukturen mit monolithisch integrierten Photodetektoren in den als Reflektor fungierenden Bragg-Gittern sind beschrieben in den Veröffentlichungen von T. Kim et al.: "A Single Transverse Mode Operation of Top Surface Emitting Laser Diode with a Integrated photo-diode" in Proc. LEOS 1995, S. 416 - 417, Oktober 1995, von S. F. Lim et al.: "Intracavity Quantum-Well Photodetection of a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser" in Proc. Int. S.C.-Laser Conf. Oktober 30 1996, Haifa/Israel, S. 183 - 184, and von J. A. Lott et al.: "Deep Red Vertical Cavity Surface Emitting Lasers With 35 Monolithically Integrated Heterojunction Phototransistors For

Output Power Control"" in Proc. Int. S.C.-Laser Conf. Oktober 1996, Haifa/Israel, S. 185 - 186. Weitere Quellen sind die Patente US 5,757,837, US 5,742,630, US 5,577,064, US 5,606,572 und US 5,136,603.

5

Die veröffentlichten Laserstrukturen mit integrierten Photodetektoren erfüllen nicht alle der folgenden Mindestbedingungen: einfache Herstellbarkeit ohne Ausbeuteverlust auf dem Wafer, guter Kontrast gegenüber spontaner Emission und Umgebungslicht, um sowohl die Laserschwelle als auch den differentiellen Wirkungsgrad feststellen zu können, geringe oder keine zusätzlichen Anforderungen an die anzulegende Spannung für das Gesamtsystem, reproduzierbare und frequenzunabhängige Rückkoppeleigenschaften und nur geringe Änderung der optischen und elektrischen Eigenschaften über lange Betriebszeiten (Deterioration).

Photodetektoren in dem Halbleiterresonator sind praktisch nicht empfindlich gegen Umgebungslicht oder Streulicht. Da die Detektoreigenschaften dieser Photodetektoren vorwiegend auf den Eigenschaften des epitaktischen Schichtwachstums beruhen, kann eine gute Ausbeute funktionsfähiger Bauelemente auch bei einer Fertigung mit großen Toleranzen erzielt werden. Um Bauelemente herzustellen, deren Photodetektoren einen guten Kontrast gegen spontane Emission liefern, kann man entweder den aktiven Detektorbereich auf eine Größe des Laserflecks reduzieren, was aber zusätzliche technische Probleme aufwirft und damit die Ausbeute reduziert (I. Y. Han, Y. H. Lee: "Oxide-apertured photodetector integrated on VCSEL" in Proc. CLEO '99, S. 176); oder die Empfindlichkeit gegenüber dem kohärenten Licht im Vergleich zur spontanen Emission kann durch einen dünnen absorbierenden Bereich an einem Schwingungsbauch der stehenden Welle erhöht werden. Indem man den Abstand dieses dünnen absorbierenden Bereiches von dem aktiven Bereich verringert, kann der Kontrast gegen spontane Emission weiter erhöht werden. Damit wird allerdings auch die Absorption der Laserstrahlung erhöht, so dass der differenti-

elle Wirkungsgrad herabgesetzt wird, was zu sehr hohen Empfindlichkeiten des Detektors von etwa 1A/W führt.

Ein anderes Problem liegt darin, in einem integrierten Bau-  
5 element höhere Laserimpedanzen im Vergleich zu einem einzel-  
nen VCSEL und damit Schwierigkeiten bei Verwendung einer  
Treiberschaltung für hochfrequente Modulation des Laserstro-  
mes zu vermeiden. Außerdem muss elektrisches Übersprechen  
zwischen Laser und Detektor minimiert werden, falls unverän-  
10 derte HF-Komponenten des Monitorsignales gebraucht werden,  
z.B. beim Justieren von Gleichstromvorspannung und Modulati-  
onstiefe.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen verbesserten  
15 VCSEL mit monolithisch integriertem Photodetektor anzugeben,  
der einfach herstellbar ist und eine ausreichend niedrige La-  
serimpedanz, niedriges Übersprechen und guten Kontrast gegen  
spontane Emission besitzt.

20 Diese Aufgabe wird mit dem optoelektronischen Bauelement mit  
den Merkmalen des Anspruches 1 gelöst. Ausgestaltungen erge-  
ben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Das erfindungsgemäße Bauelement ist ein VCSEL mit einem Pho-  
25 todetektor, der in einem der als Resonatorspiegel vorgesehe-  
nen DBR-Gitter integriert ist, so dass keine mechanische Ju-  
stage einer externen Monitordiode erforderlich ist. Zwischen  
den DBR-Reflektoren befindet sich ein aktiver Bereich, der  
für Strahlungserzeugung vorgesehen ist. Die in dem Resonator  
30 erzeugte kohärente Strahlung wird an der Oberfläche des Bau-  
elementes emittiert. Der Photodetektor in einem der DBR-  
Reflektoren umfaßt eine dünne absorbierende Schicht, die im  
Bereich eines Schwingungsbauches der stehenden Welle einer  
Lasermode angeordnet ist. Die Energiebandkante des Materials  
35 in dem dünnen absorbierenden Bereiches ist geringfügig nied-  
riger gewählt als die Energie, die der Frequenz der emittier-  
ten Strahlung entspricht, um ein nicht reproduzierbares An-

4

sprechen des Detektors zu verhindern, ohne jedoch den Anteil niedriger Energie der spontanen Emission zu absorbieren.

5      Laser und Photodetektor werden über eine gemeinsame Elektrode, vorzugsweise ein n-Kontakt, elektrisch angesteuert. Dieser Kontakt befindet sich auf einer Spacer-Schicht, die n-leitend dotiert ist mit einer ausreichenden Dotierstoffkonzentration, um einen niedrigen ohmschen Widerstand innerhalb der Schicht zu gewährleisten und auch für einen guten ohmschen Metall-Halbleiter-Kontakt zu sorgen. Diese Spacer-Schicht sorgt für niedrige Laserimpedanz und geringes elektrisches Übersprechen zwischen Laser und Photodetektor.

15     Vorzugsweise wird diese Spacer-Schicht oder eine weitere Schicht zwischen dem laseraktiven Bereich und dem Photodetektor so gewählt, dass das kohärente Licht durch diese Schicht hindurch tritt, aber der Anteil hoher Energie der spontanen Emission absorbiert wird, so dass damit für die spontane Emission ein Tiefpassfilter gebildet ist. Zusammen mit der 20     Eigenschaft des dünnen absorbierenden Bereiches, einen Hochpassfilter zu bilden, ist so insgesamt ein Bandpassfilter gebildet, dessen Durchlassbereich um die Laserstrahlungsfrequenz herum liegt und so den Kontrast gegen spontane Emission weiter erhöht.

25     Es folgt eine genauere Beschreibung von Beispielen des erfindungsgemäßen Bauelementes anhand der Figuren 1 bis 5.

30     Figur 1 zeigt einen Querschnitt durch ein Ausführungsbeispiel des Bauelementes.

Figur 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel.

35     Figur 3 zeigt ein Ersatzschaltbild für die in den Figuren 1 und 2 dargestellten Bauelementstrukturen.

Figur 4 zeigt ein Diagramm für eine Feldverteilung um die Spacer-Schicht.

Figur 5 zeigt ein Energiebanddiagramm einer speziellen Ausführungsform.

Figur 1 zeigt einen Querschnitt einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Bauelementes mit einem Photodetektor zwischen einem Substrat und dem strahlungserzeugenden aktiven Bereich, während Figur 2 einen entsprechenden Querschnitt für ein Bauelement zeigt, bei dem der Photodetektor auf der von dem Substrat abgewandten Seite des aktiven Bereiches angeordnet ist. Bei dem Ausführungsbeispiel nach Figur 1 befinden sich auf einem vorzugsweise p-leitend dotierten Substrat 12 mit einem Rückseitenkontakt 10 übereinander ein in diesem Beispiel p-leitend dotierter erster Anteil 15 eines unteren ersten DBR-Gitters, ein intrinsisch leitender Bereich 20 des Photodetektors mit einer darin angeordneten dünnen Absorptionsschicht 25, eine Spacer-Schicht 30, die hier hoch n-leitend dotiert ist, ein n-leitend dotierter zweiter Anteil 40 des ersten DBR-Gitters, ein laseraktiver Bereich 45 mit einer darin ausgebildeten aktiven Schicht 47 und ein p-leitend dotiertes oberes zweites DBR-Gitter. Der aktive Bereich 45, 47 ist vorzugsweise als SCH (Separate Confinement Heterostructure) ausgebildet. Auf der Spacer-Schicht 30 befindet sich in diesem Beispiel ein ringförmiger Kontakt 35, der rings um eine Mesa aus Halbleitermaterial angeordnet ist, in der sich der obere Anteil 40 des ersten DBR-Gitters, der aktive Bereich 45, 47 und das zweite DBR-Gitter 50 befinden.

Die Absorptionskante des Energiebandes ist in der absorbirenden Schicht 25 geringfügig niedriger gewählt als die Energie des kohärenten Lichtes der erzeugten Lasermode. Auf diese Weise kann die Strahlung der Lasermode sicher detektiert werden, ohne gleichzeitig den Anteil niedriger Energie in der spontanen Emission zu erfassen. Für eine Laserenergie von

z.B. 1460 meV kann die Absorptionskante bei etwa 1450 meV gewählt werden. In diesem Beispiel ist die dünne Absorptions- schicht typisch etwa 7 nm dick und als InGaAs-Potentialtopf mit einem Indiumgehalt von wenigen Prozent ausgebildet. Bei 5 der Festlegung der richtigen Absorptionskante sind der Ein- fluss von Excitonen und der Temperatur zu berücksichtigen. Die Absorptionskante kann z.B. mittels Transmissionsspektroskopie gemessen werden. Je geringer der Unterschied zwischen der ef- fektiven Energiebandlücke und der Energie der Laserstrahlung 10 ist, um so geringer ist der Anteil der absorbierten spontanen Emission im oberen Energiebereich und um so besser ist der Kontrast gegen die spontane Emission.

15 Die Spacer-Schicht 30 hat vorzugsweise eine Dicke von mehre- ren Wellenlängen der Laserstrahlung und ist vorzugsweise di- rekt über dem intrinsisch leitenden Bereich 20 des Photode- tektors angeordnet. Die effektive Energiebandlücke der Spacer-Schicht 30 wird so gewählt, dass sie die kohärente 20 Strahlung der Lasermode nicht absorbiert, aber den Anteil ho- her Energie der spontanen Emission absorbiert.

Ein oberer ringförmiger p-Kontakt 55 vervollständigt das Bau- element. Grundsätzlich kann auch ein lichtdurchlässiger obe- 25 rer Kontakt aufgebracht sein, der dann die gesamte Licht- austrittsfläche bedeckt. Alternativ kann auch Lichtaustritt nach unten durch das Substrat 12 hindurch vorgesehen sein. Das Substrat ist dann entsprechend aus einem für die Emissi- 30 onswellenlänge durchlässigen Halbleitermaterial gebildet. Au- ßerdem sind auch andere Laserwellenlängen, z.B. 980 nm oder 1300 nm mit einem entsprechend gewählten Halbleitermaterial der dünnen Absorptionsschicht des Photodetektors möglich. Dieses Material ist geringfügig verschieden von dem Material 35 der aktiven Schicht, weil ein etwas niedrigerer Energie- bandabstand in der absorbierenden Schicht erforderlich ist als in der aktiven Schicht. Die Vorzeichen der Dotierung (n- leitend bzw. p-leitend) können vertauscht sein. Die in obiger

Beschreibung angegebenen Vorzeichen stellen aber das bevorzugte Ausführungsbeispiel dar.

Die Monitorfunktion des Photodetektors hängt nicht von der

5 Polarisationsrichtung oder den Eigenschaften der Transversalmoden der VCSEL ab. Eine Variation des aktiven Bereiches oder der Form der Mesastruktur mit dem darin vorhandenen aktiven Bereich liegt im Rahmen der Erfindung.

10 In einer anderen bevorzugten Ausführungsform entsprechend Figur 2 sind die Positionen der SCH-Struktur 45 mit der aktiven Schicht 47 und des Photodetektorbereiches mit der intrinsisch leitenden Schicht 20 und der dünnen Absorptionsschicht 25 miteinander vertauscht. Der Photodetektor befindet sich hier

15 oberhalb der dicken n-dotierten Spacer-Schicht 30. Der aktive Bereich mit der aktiven Schicht 47 befindet sich zwischen einem p-leitend dotierten ersten Anteil 50 und einem n-leitend dotierten zweiten Teil 40 eines unteren DBR-Gitters zwischen der Spacer-Schicht 30 und dem Substrat 12. Auf der Spacer-Schicht 30 ist auch hier ein n-Kontakt 35 aufgebracht. Der

20 Photodetektor 20, 25 ist innerhalb der streifenförmigen Mesastruktur angeordnet, und zwar unterhalb eines oberen p-leitend dotierten DBR-Gitters 15. Die Detektoranode wird durch einen p-Kontakt 10 auf der Oberseite gebildet. Für diesen

25 Kontakt gilt sinngemäß das, was zu dem Ausführungsbeispiel gemäß Figur 1 erläutert wurde.

Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Bauelementes liegt darin, daß der effektive Photodetektorbereich verringert werden kann, was einen besseren Kontrast gegen spontane Emission und eine geringere Photodetektorkapazität liefert. Damit erreicht man eine hohe Detektorgeschwindigkeit. Geringe Laserkapazitäten können erreicht werden, indem man die für den Laser vorgesehene Struktur innerhalb des Ausführungsbeispiels gemäß Figur 2 mit möglichst geringen Abmessungen ausbildet, die allerdings größer sein müssen als die Abmessungen

der Mesa des Photodetektors. Für die Herstellung werden bevorzugt Trockenätzverfahren angewendet.

Der auf der Spacer-Schicht 30 aufgebrachte n-Kontakt 35 muß 5 nicht ein ringförmiger Kontakt sein. Wegen des geringen ohmschen Widerstandes der ausreichend hoch n-leitend dotierten Spacer-Schicht 30 ist auch eine asymmetrische seitliche Ladungsträgerinjektion ohne Verschlechterung der Lasereigenschaften möglich. Der Kontakt 35 kann daher auf einer seitlichen 10 Oberseite der Spacer-Schicht 30 außerhalb des Bereiches der Mesa mit dem Photodetektor aufgebracht sein. Dann kann der untere Teil der Struktur mit dem laseraktiven Bereich auch als Mesa mit fast ebenso geringen Abmessungen wie die Abmessungen des Photodetektorbereiches ausgebildet sein.

15 Die übrigen Eigenschaften der beschriebenen Ausführungsbeispiele können entsprechend herkömmlichen VCSEL ausgebildet sein. Gold-Metall-Legierungen sind bevorzugte Kontaktmaterialien. Bevor das Metall auf die Halbleiteroberseite aufgebracht wird, wird diese von evtl. vorhandenen Oxiden befreit. Um gute Metall-Halbleiter-Kontakte zu erreichen auch im Falle stark variierender Mischkristallzusammensetzungen, was z.B. bei den DBR-Gittern der Fall ist, müssen auch Inhomogenitäten der Ätztiefe berücksichtigt werden. Diese Inhomogenitäten variieren mit dem Materialsystem, das verwendet wird, und der Art des Ätzprozesses (Trockenätzen, Nassätzen), hängen aber hauptsächlich von der Gleichmäßigkeit der epitaktisch gewachsenen Schichten ab. Im Fall von AlGaAs und Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid in wässriger Lösung als naßchemischer Ätzlösung erreichen typische Inhomogenitäten Abweichungen von  $\pm 20$  nm pro Mikrometer Ätztiefe. Es ist schwierig, gute und stabile ohmsche Kontakte auf Schichten mit hohem oder variierendem Aluminiumgehalt zu erreichen. Erfindungsgemäß wird das Bauelement daher mit einer dicken, homogenen und hoch n-leitend dotierten Halbleiterschicht als Spacer-Schicht 30 versehen. Bei dieser dicken Spacer-Schicht 30 sind Toleranzen der Ätztiefe akzeptabel; außerdem dient die Schicht als ge-

meinsame niederohmige Kontaktsschicht für Laser und Photodetektor.

Eine n-dotierte Spacer-Schicht angrenzend an den Photodetektor wie in dem erfindungsgemäßen Bauelement hat verschiedene Vorteile. Parasitäre Lichtabsorption durch freie Ladungsträger ist üblicherweise in n-leitend dotiertem Halbleitermaterial niedriger als in p-leitend dotiertem (zumindest für die Mehrzahl üblicherweise verwendeter Halbleitermaterialien).

10 Z. B. ist im Materialsystem von AlGaAs bei 850 nm Wellenlänge die optische Absorption in p-dotiertem Material ungefähr um einen Faktor von 2,5 bis 3 höher als in n-dotiertem Material derselben Dotierstoffkonzentration. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung einer n-dotierten Spacer-Schicht angrenzend an den Photodetektor ist der entsprechend niedrigere ohmsche Widerstand, der mit n-leitendem Halbleitermaterial im Vergleich zu p-leitendem Material erreicht wird. Das liegt an der höheren Beweglichkeit der Elektronen als der Löcher, z.B. um einen Faktor von etwa 20 in AlGaAs. Wenn ein pin-Photodetektor ohne zusätzlichen Tunnelübergang gefordert ist (d.h. ohne p<sup>+</sup>-n<sup>+</sup>-Übergang, der sich bei Polung in Gegenrichtung wie ein ohmscher Widerstand verhält), wird das DBR-Gitter auf ein p<sup>+</sup>-Substrat, vorzugsweise unter Verwendung einer Pufferschicht, die bei niedriger Temperatur hergestellt wird, aufgewachsen.

15 20 25 30 35 Statt dessen kann ein konventioneller npn-Bipolarphototransistor mit Basis auf floatendem Potential und gradierter Energiebandlücke (HBPT) als Photodetektor verwendet werden, wobei an den Photodetektor eine zusätzliche Spannung angelegt wird. Dieses Bauelement kann auf einem n-Substrat aufgewachsen werden. Alternativ kann auch eine Doppeldiodenstruktur mit gemeinsamer Anode (npn) oder gemeinsamem Tunnelkontakt (npp<sup>+</sup>n<sup>+</sup>np) als Detektor verwendet werden, wobei beide Photodioden zu Kompensationszwecken unterschiedliche Absorptions-eigenschaften aufweisen können. So ist durch interne oder externe Überlagerung der Photoströme eine Erhöhung des Kontrastverhältnisses möglich, wenn die detektierende Schicht (25) der ersten Photodiode in einem Schwingungsbauch und die

10

detektierende Schicht der zweiten Photodiode im Schwingungsknoten der stehenden Welle liegt und beide Photoströme voneinander abgezogen werden.

5 In Figur 3 ist ein Ersatzschaltbild für eine grundsätzliche Struktur des erfindungsgemäßen Bauelementes mit integriertem pin-Photodetektor entsprechend Figur 1 oder 2 dargestellt. Der obere Teil dieses Diagramms in Figur 3 entspricht der intrinsischen Laserimpedanz, die in erster Linie durch den ohmschen Laserwiderstand  $R_A$  im Betrieb des Lasers parallel zu der effektiven Laserkapazität  $C_L$  bestimmt wird. Der untere Teil des Diagramms gibt die Kapazität  $C_D$  des Photodetektors parallel zur Stromquelle  $i_D$  für den Photostrom wieder. Der gemeinsame n-Kontakt hat einen Reihenwiderstand  $R_T$ , der durch den lateralen ohmschen Widerstand in der dicken n-dotierten Spacer-Schicht 30 bestimmt wird. Wesentliche dynamische Größen sind die RC-Zeitkonstanten  $\tau_L$ ,  $\tau_D$  des Lasers bzw. des Photodetektors. Die letztere wird beeinflusst durch den externen Messwiderstand  $R_M$  und ist gleich  $\tau_D = C_D (R_D + R_T + R_M)$ . Bei kleinen vorhandenen Photodetektorkapazitäten kann eine kleine Photodetektorkapazität erzielt werden, aber in diesem Fall ist der innere Widerstand  $R_D$  größer ( $R_D = \text{const}/C_D$ ), was einen zusätzlichen parasitären Spannungsabfall verursacht, der die lineare Eigenschaft des Photodetektors bei Betrieb mit kleinen oder verschwindend geringen Detektorspannungen  $V_D$  verschlechtern kann.

Die intrinsische RC-Zeitkonstante für den Laser ist gegeben durch  $\tau_L = R_A C_L$ . Abgesehen davon und von anderen intrinsischen Größen, wie z.B. die Laserresonanzfrequenz und die Photonenlebensdauer, ist die Gesamtlaserimpedanz  $(R_L + R_A) / (C_L + R_T)$  eine sehr wichtige Größe, die parallel zu Kapazitäten einer Treiberschaltung oder eines modularen Aufbaus auftritt und so klein wie möglich sein sollte, um die Verwendung billiger Lasertreiberschaltungen zu ermöglichen.

11

Im Falle niedriger Frequenzen oder verschwindendem  $C_D$  gibt die Beziehung  $R_T(C_L + R_T) / (R_L + R_A)$  den Anteil der Lasermodulationsspannung wieder (parasitäre Wechselspannung am Knoten 110), der parasitär auch am Photodetektor anliegt. Wenn

5 ein Photodetektor mit einer stark spannungsabhängigen Empfindlichkeit verwendet wird, wie z.B. ein Phototransistor, sind ein kleiner Wert  $R_T$  und hohe anliegende Photodetektorspannungen zu bevorzugen.

10 Für elektrisches Übersprechen zwischen dem Laser und dem Photodetektor bei hohen Frequenzen kann eine Kopplungszeitkonstante durch  $\tau_{coup} = R_T C_D$  definiert werden. Bei einer Modulationsfrequenz  $f = 1 / (2\pi \tau_{coup})$  wird etwa die Hälfte der parasitären Wechselspannung am Knoten 110 in den Widerstand  $R_D + R_M$

15 über die Photodetektorkapazität gekoppelt, und zwar dem Photostromsignal überlagert. Um die hochfrequenten Komponenten des Photostromes zu erfassen, wird ein kleiner Wert von  $\tau_D$  benötigt. Aber der Spannungsabfall, der durch den Photostrom über die Widerstände  $R_D + R_M$  hervorgerufen wird, muß immer

20 noch groß sein im Vergleich zu besagter parasitärer Wechselspannung, um das Übersprechen zu minimieren. Daher soll der laterale Widerstand  $R_T$  zur Erzeugung guter Modulationseigenschaften des Lasers und guter Hochfrequenzeigenschaften des Photodetektorsignales so gering wie möglich sein, auch

25 wenn als Photodetektor eine pin-Photodiode hoher Qualität verwendet wird.

Die optische Dicke des Photodetektorbereiches einschließlich der dicken Spacer-Schicht im Vergleich zu der Laserwellenlänge ist ebenfalls eine wichtige Größe. Sie bestimmt, ob der Photodetektor in dem Resonator die Laserintensität resonant beeinflusst oder nicht. Ein beliebiger Photodetektor kann eine dünne Absorptionsschicht an einer bestimmten Stelle innerhalb des Musters der stehenden Welle des kohärenten Lichtes

30 aufweisen. Eine erste Verbesserung der Detektionsempfindlichkeit kann erzielt werden, indem nur das Maximum der Intensitätsverteilung erfasst wird. Diese Verstärkung kann mittels

35

12

des sogenannten Confinement-Faktors quantifiziert werden. Eine weitere Verstärkung ist möglich, wenn die Position des Detektors in den DBR-Gittern in der Nähe des aktiven Bereiches gewählt wird. In Figur 4 ist die berechnete Feldverteilung 5 für die kohärente Strahlung für eine spezielle Ausführungsform entsprechend Figur 1 in der Nachbarschaft der dicken Spacer-Schicht dargestellt.

Um zu vermeiden, dass die Spacer-Schicht 30 eine unbeabsichtigte Resonanz in Bezug auf die Laserwellenlänge besitzt, 10 sollte die Dicke der Spacer-Schicht in etwa ein ungerades Vielfaches eines Viertels der Laserwellenlänge betragen. Eine nicht resonante Spacer-Schicht hat den Vorteil einer geringen Abhängigkeit der Photodetektoreigenschaften, wie z.B. des Ansprechverhaltens, von der genauen Dicke der Epitaxieschicht. 15 Da bei dem erfindungsgemäßen Bauelement die Spacer-Schicht relativ dick ist im Vergleich zur Laserwellenlänge, ist eine genaue Einstellung der Dicke der Schicht sehr wichtig. Beim epitaktischen Aufwachsen der Schichten kann die Genauigkeit 20 der Schichtdicke durch In-situ-Kontrolle verbessert werden. Die notwendige absolute Genauigkeit der Schichtdicke ist durch eine Schichtdicke bestimmt, die wesentlich unter einer Viertelwellenlänge liegt. Bei einem speziellen Ausführungsbeispiel, wie es oben beschrieben wurde, führt eine Abweichung von etwa  $\pm 13$  nm von einer Gesamtdicke von 1,3  $\mu\text{m}$  der 25 Spacer-Schicht zu einer Streuung von etwa  $\pm 5\%$  in der Photodetektorempfindlichkeit.

Figur 5 zeigt ein vereinfachtes Energiebanddiagramm, für eine 30 spezielle Ausführungsform mit gradierter Dotierung und Energiebandlücke in der absorbierenden Schicht und den angrenzenden Schichten. Auf diese Weise kann die Absorption innerhalb der dünnen Absorptionsschicht als Folge der Dotierstoffkonzentration reduziert werden; und gleichzeitig kann parasitäre 35 Rekombination der Ladungsträger vermieden werden, was zu niedrigeren Empfindlichkeiten des Detektors und höherem differentiellem Wirkungsgrad des Lasers ohne Beeinträchtigung

des Kontrastes gegen spontane Emission führt. Der pin-Photodetektor umfaßt einen p-dotierten Bereich 125, eine intrinsisch leitend dotierte Schicht 130, mit der die Photodetektorkapazität vermindert wird, und eine n-dotierte

5 Schicht 150. Im Gegensatz zu herkömmlichen Potentialtopf-pin-Dioden, die an sich bekannt sind, ist hier die absorbierende Schicht 41 hoch n-leitend dotiert und in hoch n-leitend dotierte Schichten 135 und 145 eingebettet, um die optische Absorption zu vermindern. Z.B. ist für eine Reduktion der optischen Absorption um mehr als einen Faktor 3 eine Dotierstoffkonzentration von mehr als  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  in InGaAs-Potentialtöpfen mit einem Indiumgehalt von wenigen Prozent erforderlich. Der Photostrom muss aus der hoch dotierten Zone geleitet werden, um zu vermeiden, dass die Löcher 137 mit den

10 15 Elektronen 147 rekombinieren. In dieser Ausführungsform des erfindungsgemäßen Bauelementes haben die angrenzenden hoch dotierten Schichten ein Energiebandgrading, das zu einer Reduktion der Energiebandlücke und damit in der Richtung zu der intrinsisch dotierten Schicht 130 zu einer Reduktion der Differenz zwischen dem Valenzband und dem Fermi-Niveau führt. Zusätzlich können asymmetrische Barrieren für die dünne absorbierende Schicht 140 verwendet werden, und zwar mit einer niedrigeren Barrierenhöhe in Richtung zur Schicht 135, wie in der Figur 5 dargestellt.

25 Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Elektronendichte in der dünnen absorbierenden Schicht 140 dadurch zu ändern, dass eine Photodetektorspannung angelegt wird in der Weise, dass die Verarmungszone in die absorbierende Schicht hinein 30 reicht. Auf diese Weise kann der Absorptionsgrad durch die angelegte Spannung moduliert werden. Mittels geeigneter Anpassung der Dotierstoffkonzentration und der Dicke der Schicht 135 sowie der Schicht 130 können die Modulationstiefe und die DC-Vorspannung geändert werden:

## Patentansprüche

1. Optoelektronisches Bauelement als VCSEL mit einer für Strahlungserzeugung vorgesehenen aktiven Schicht (47) zwischen DBR-Gittern (15; 40, 50) als Reflektoren und einem mit einer strahlungsabsorbierenden Schicht (25) versehenen Photodetektor innerhalb eines der DBR-Gitter, wobei die strahlungsabsorbierende Schicht (25) so angeordnet ist, dass sie mit einem Schwingungsbauch einer Lasermode der erzeugten Strahlung überlappt,  
dadurch gekennzeichnet, dass eine dicke und hoch dotierte Spacer-Schicht (30) zwischen der aktiven Schicht (47) und der absorbierenden Schicht (25) vorhanden ist.
- 15 2. Bauelement nach Anspruch 1,  
bei dem die strahlungsabsorbierende Schicht (25) eine Energiebandkante aufweist, die geringfügig niedriger ist als die Photonenenergie der Lasermode.
- 20 3. Bauelement nach Anspruch 1 oder 2,  
bei dem der Photodetektor (20, 25) und die Spacer-Schicht (30) bezüglich der Lasermode eine nicht-resonante optische Dicke haben, so dass eine elektrische Feldverteilung der Strahlung innerhalb der DBR-Gitter (15; 40, 50) unverändert bleibt.
- 25 4. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 3,  
bei dem die Spacer-Schicht (30) eine Energiebandkante aufweist, die geringfügig höher ist als die Photonenenergie der Lasermode.
- 30 5. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4,  
bei dem die Spacer-Schicht (30) hoch n-leitend dotiert ist und mindestens eine Halbleiterschicht an die absorbierende Schicht (25) angrenzt und hoch n-leitend dotiert ist.

15

6. Bauelement nach Anspruch 5,  
bei dem mindestens eine an die absorbierende Schicht (25) an-  
grenzende Halbleiterschicht eine Gradierung in der Energie-  
bandlücke aufweist, so dass in einem zu der absorbierenden  
5 Schicht benachbarten Bereich die Energiebandlücke in Richtung  
zu der Spacer-Schicht (30) hin anwächst.
7. Bauelement nach Anspruch 5 oder 6,  
bei dem die strahlungsabsorbierende Schicht (25) innerhalb  
10 einer Verarmungsschicht oder nahe an einem n-dotierten Rand-  
bereich einer Verarmungsschicht liegt und  
Mittel vorhanden sind, mit denen eine elektrische Spannung  
angelegt werden kann, um die Absorption in der absorbierenden  
Schicht (25) zu verändern.
- 15 8. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
bei dem der Photodetektor eine pin-Photodiode ist.
9. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
20 bei dem der Photodetektor ein Phototransistor aus der Gruppe  
von bipolarem Phototransistor und heterobipolarem Phototran-  
sistor ist.
10. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
25 bei dem der Photodetektor aus zwei Photodioden besteht, die  
eine gemeinsame Anode (npn) oder eine gemeinsame Kathode  
(pnp) aufweisen.
11. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
30 bei dem der Photodetektor aus zwei Photodioden besteht, die  
einen gemeinsamen Tunnelkontakt (npp<sup>+</sup>n<sup>+</sup>np) aufweisen.

1/3

FIG 1

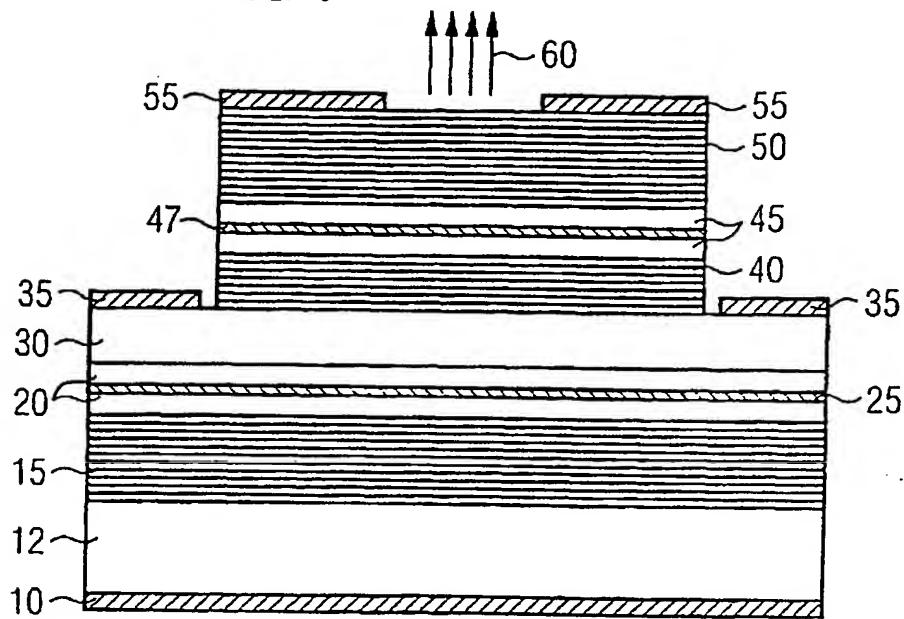
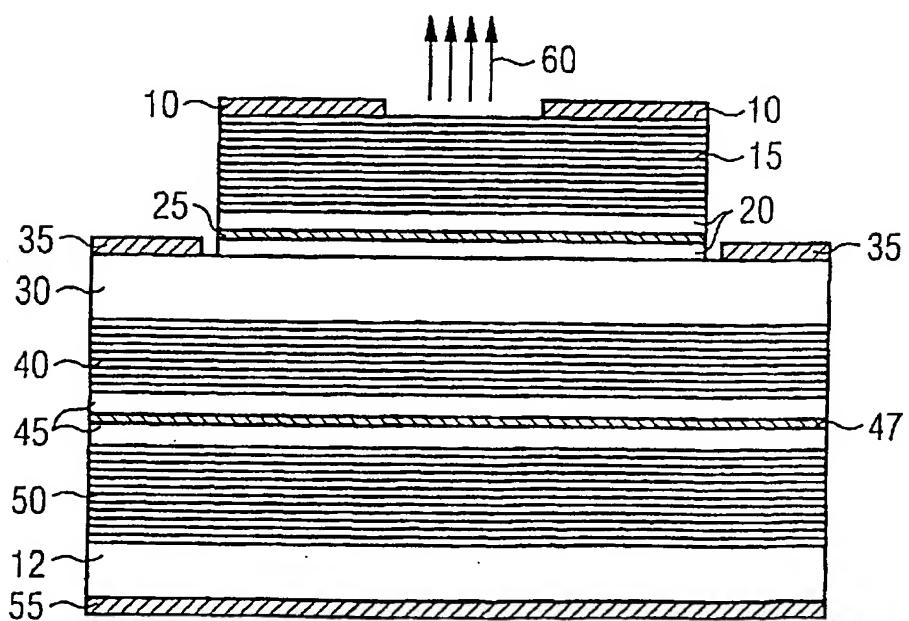
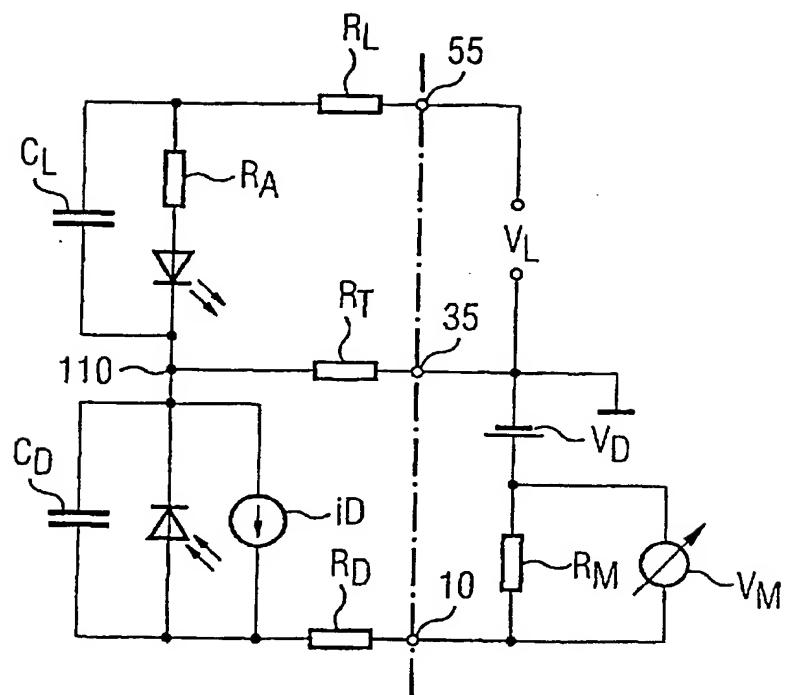


FIG 2



2/3

FIG 3



3/3

FIG 4

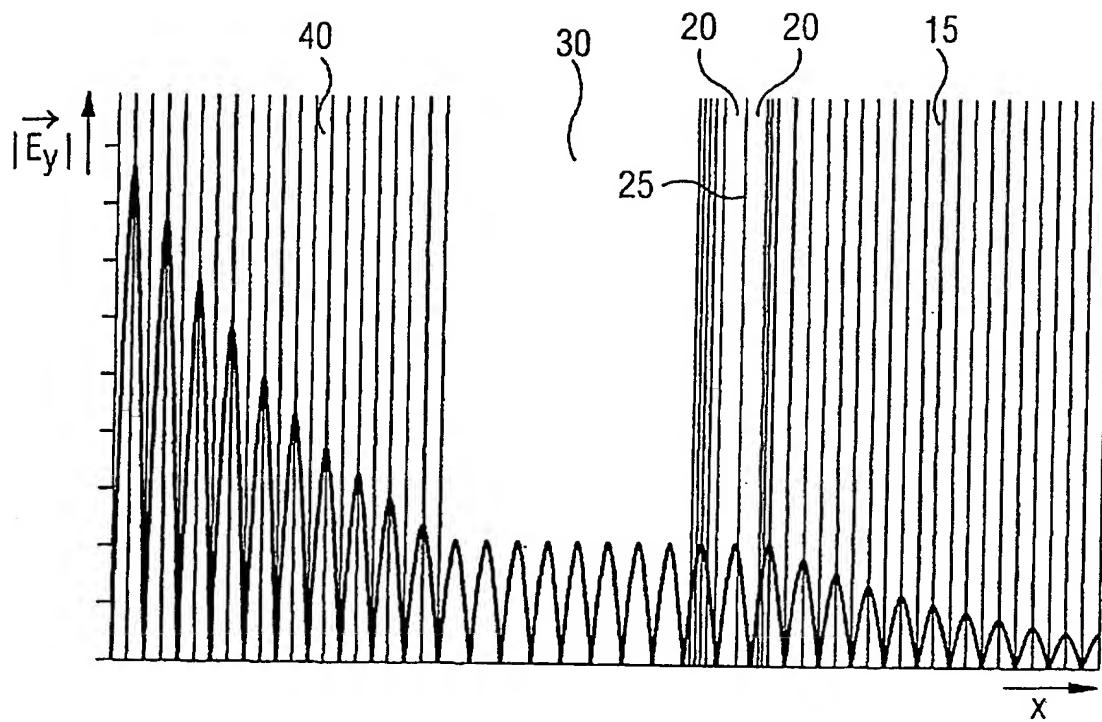
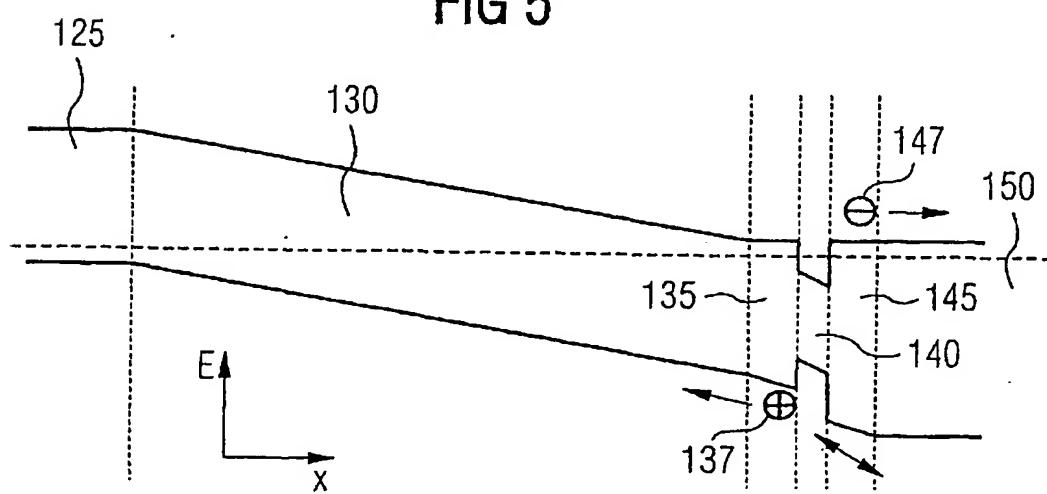


FIG 5



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int'l. Application No  
PCT/DE 01/00352A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 H01S5/183 H01S5/026

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 606 572 A (SWIRHUN STANLEY E ET AL) 25 February 1997 (1997-02-25) cited in the application column 5, line 23 - line 63; figure 1 ---	1-11
A	EP 0 899 836 A (XEROX CORP) 3 March 1999 (1999-03-03) column 7, line 9 - line 12 ---	1
A	EP 0 565 374 A (NIPPON ELECTRIC CO) 13 October 1993 (1993-10-13) column 3, line 56 - line 58 ---	1
A	US 5 892 786 A (LOTT JAMES A) 6 April 1999 (1999-04-06) figures 4-7 ---	8-11
		-/-

 Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the International filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the International filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the International search

12 June 2001

Date of mailing of the International search report

22/06/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl.  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Jobst, B

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int'l. Application No.  
PCT/DE 01/00352

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ORTIZ G G ET AL: "MONOLITHIC INTEGRATION OF IN0.2GA0.8AS VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASERS WITH RESONANCE-ENHANCED QUANTUM WELL PHOTODETECTORS" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 32, no. 13, 20 June 1996 (1996-06-20), pages 1205-1207, XP000599193 ISSN: 0013-5194 the whole document	3

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Int'l	Application No
PCT/DE 01/00352	

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)			Publication date
US 5606572 A	25-02-1997	AU	2193695 A		09-10-1995
		WO	9526051 A		28-09-1995
		US	5577064 A		19-11-1996
EP 0899836 A	03-03-1999	JP	11121878 A		30-04-1999
EP 0565374 A	13-10-1993	JP	2874442 B		24-03-1999
		JP	5299689 A		12-11-1993
		DE	69319366 D		06-08-1998
		DE	69319366 T		22-10-1998
		US	5293393 A		08-03-1994
US 5892786 A	06-04-1999	NONE			

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Int. nationales Aktenzeichen

PCT/DE 01/00352

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 H01S5/183 H01S5/026

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 606 572 A (SWIRHUN STANLEY E ET AL) 25. Februar 1997 (1997-02-25) in der Anmeldung erwähnt Spalte 5, Zeile 23 – Zeile 63; Abbildung 1 —	1-11
A	EP 0 899 836 A (XEROX CORP) 3. März 1999 (1999-03-03) Spalte 7, Zeile 9 – Zeile 12 —	1
A	EP 0 565 374 A (NIPPON ELECTRIC CO) 13. Oktober 1993 (1993-10-13) Spalte 3, Zeile 56 – Zeile 58 —	1
A	US 5 892 786 A (LOTT JAMES A) 6. April 1999 (1999-04-06) Abbildungen 4-7 — —/—	8-11

 Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- \* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- \*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- \*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- \*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- \*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benützung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- \*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- \*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- \*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung, nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- \*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- \*&\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

12. Juni 2001

22/06/2001

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Jobst, B

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/DE 01/00352

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	ORTIZ G G ET AL: "MONOLITHIC INTEGRATION OF IN0.2GA0.8AS VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASERS WITH RESONANCE-ENHANCED QUANTUM WELL PHOTODETECTORS" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, Bd. 32, Nr. 13, 20. Juni 1996 (1996-06-20), Seiten 1205-1207, XP000599193 ISSN: 0013-5194 das ganze Dokument -----	3

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Int.	nales Aktenzeichen
PCT/DE 01/00352	

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie			Datum der Veröffentlichung
US 5606572 A	25-02-1997	AU	2193695 A		09-10-1995
		WO	9526051 A		28-09-1995
		US	5577064 A		19-11-1996
EP 0899836 A	03-03-1999	JP	11121878 A		30-04-1999
EP 0565374 A	13-10-1993	JP	2874442 B		24-03-1999
		JP	5299689 A		12-11-1993
		DE	69319366 D		06-08-1998
		DE	69319366 T		22-10-1998
		US	5293393 A		08-03-1994
US 5892786 A	06-04-1999	KEINE			

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

**BLACK BORDERS**

**IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

**FADED TEXT OR DRAWING**

**BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

**SKEWED/SLANTED IMAGES**

**COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

**GRAY SCALE DOCUMENTS**

**LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

**REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

**OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**